



ITWissen

Das große Online-Lexikon  
für Informationstechnologie

Glossar

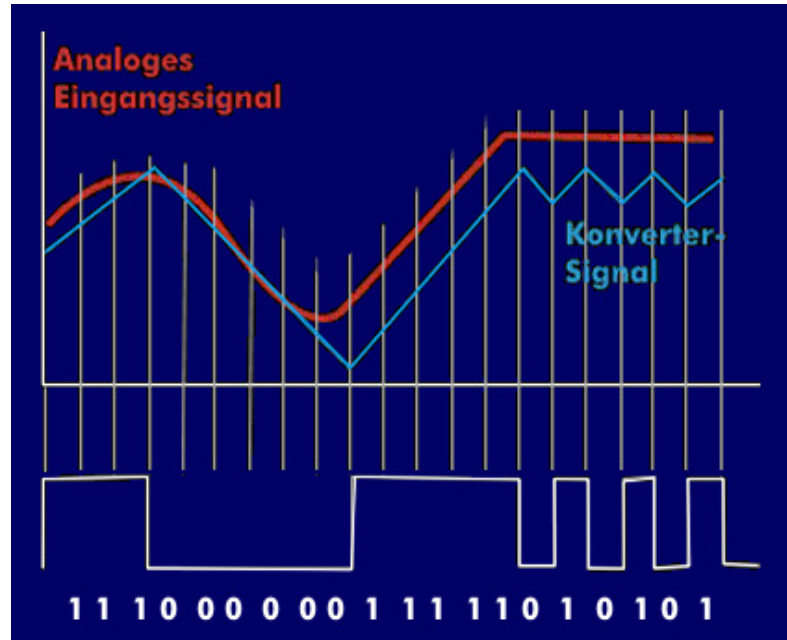
A/D-Wandler

- [1-Bit-Wandler](#)
- [Abtastrate](#)
- [Abtastung](#)
- [Abtastungen pro Sekunde](#)
- [AD-Wandler, A/D](#)
- [ADPCM, adaptive delta pulse code modulation](#)
- [Auflösung](#)
- [DA-Wandler, D/A](#)
- [DAC, digital to analoge converter](#)
- [Digitalisierung](#)
- [Digitizer](#)
- [DPCM, differential pulse code modulation](#)
- [Differenzielle Pulsmodulation](#)
- [Dual-Slope-Verfahren](#)
- [ENOB, effective number of bits](#)
- [Flash-Wandler](#)
- [Genauigkeit](#)
- [Iteration](#)
- [Klirrfaktor](#)
- [Linearität](#)
- [LSB, least significant bit](#)
- [MSB, most significant bit](#)
- [OSR, oversampling ratio](#)
- [Oversampling](#)
- [Parallelumsetzer](#)
- [Pipeline-Wandler](#)
- [Pulsweitenmodulation PWM](#)
- [Quantisierung](#)
- [Quantisierungsfehler](#)
- [R-2R-Konverter](#)
- [Sampletiefe](#)
- [SAR, successive approximation register](#)
- [SFDR, spurious-free dynamic range](#)
- [S/H, sample and hold](#)
- [Sigma-Delta-Wandler](#)
- [Signal-Rausch-Verhältnis](#)
- [SINAD, signal to noise and distortion](#)
- [Slope-Verfahren](#)
- [Störspannungsabstand](#)
- [Wandlungsfehler](#)
- [Wandlungsgeschwindigkeit](#)
- [Zählverfahren](#)



# A/D-Wandler

## 1-Bit-Wandler 1 bit converter



Prinzip der 1-Bit-Deltamodulation

A/D-Wandlung lediglich die Pegelunterschiede von einem Abtastwert zum folgenden gekennzeichnet. Ist ein Abtastwert höher als der vorherige, wird eine digitale „1“ ausgewiesen, steigt der Pegel weiter an, ist der folgende Abtastwert ebenfalls eine „1“. Erst bei fallendem Pegel tritt anstelle der „1“ eine „0“.

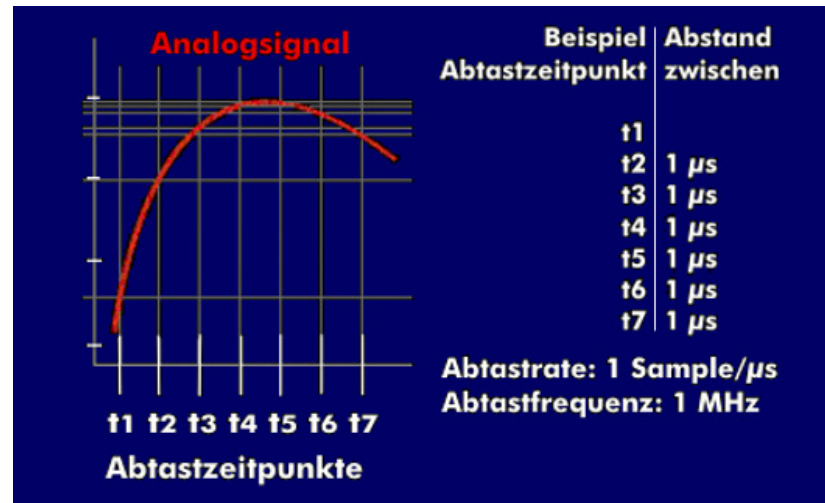
Die Abtastrate, auch als Abtastfrequenz bezeichnet, ist die Zeit, die sich bei einer *Abtast- und Halteschaltung* (S/H) aus der Zeit zwischen zwei *Abtastungen* ergibt. Sie wird angegeben in *Samples per Second* (S/s). Wird beispielsweise ein analoges Signal pro Millisekunde (ms)

Wie die Bezeichnung 1-Bit-Wandler bereits erkennen lässt, arbeiten entsprechende Wandler nur mit einem einzigen Bit, das die Werte „0“ oder „1“ annehmen kann. Da alle 1-Bit-Wandler nach dem Sigma-Delta-Verfahren arbeiten, werden sie synonym auch als *Sigma-Delta-Wandler* bezeichnet. Im Gegensatz zu Mehr-Bit-Wandlern ist bei den 1-Bit-Wandlern die *Abtastfrequenz* um ein Vielfaches höher, damit überhaupt höhere *Auflösungen* erreicht werden. Eine Auflösung von 16 Bit, wäre mit einer sechzehnfach höheren Abtastrate realisierbar.

Beim Sigma-Delta-Wandler werden mit der

## Abtastrate sampling rate

# A/D-Wandler



Zusammenhang zwischen Abtastrate und -frequenz

maximal 4 kHz beträgt die Abtastrate 8 kHz, das entspricht einem Sample-Abstand von 125  $\mu$ s. Bei Audio mit einem maximalen Frequenzumfang von 20 kHz beträgt die Abtastrate 44,1 kHz (22,67  $\mu$ s) und 48 kHz (20,83  $\mu$ s). Bei qualitativ hochwertigem Mehrkanal-Audio kann die Abtastrate bis zu 192 kHz betragen. Wesentlich höhere Werte ergeben sich bei Video und HDTV. So ergibt sich bei Digitalvideo mit einer Bandbreite von 6,5 MHz für das Luminanzsignal eine Abtastrate von über 13 MHz und einem Sample-Abstand von 74 ns. Noch höher ist die Abtastrate bei HDTV mit 74 MHz und einer Samplerate von 13,5 ns.

Ist die Abtastrate um ein Vielfaches höher als die theoretisch erforderliche Abtastfrequenz, spricht man von *Oversampling*.

einmal abgetastet, dann beträgt die Abtastfrequenz 1 kHz, die Abtastrate 1000 Samples pro Sekunde. Die Abtastrate ist abhängig von der Frequenz des abzutastenden Signals und unterliegt dem Abtasttheorem, nach dem eine Signalreproduktion eine Abtastrate voraussetzt, die mindestens doppelt so hoch ist, wie die Signalfrequenz.

Im Falle der Sprachübertragung über ISDN mit einem Frequenzumfang von

# A/D-Wandler

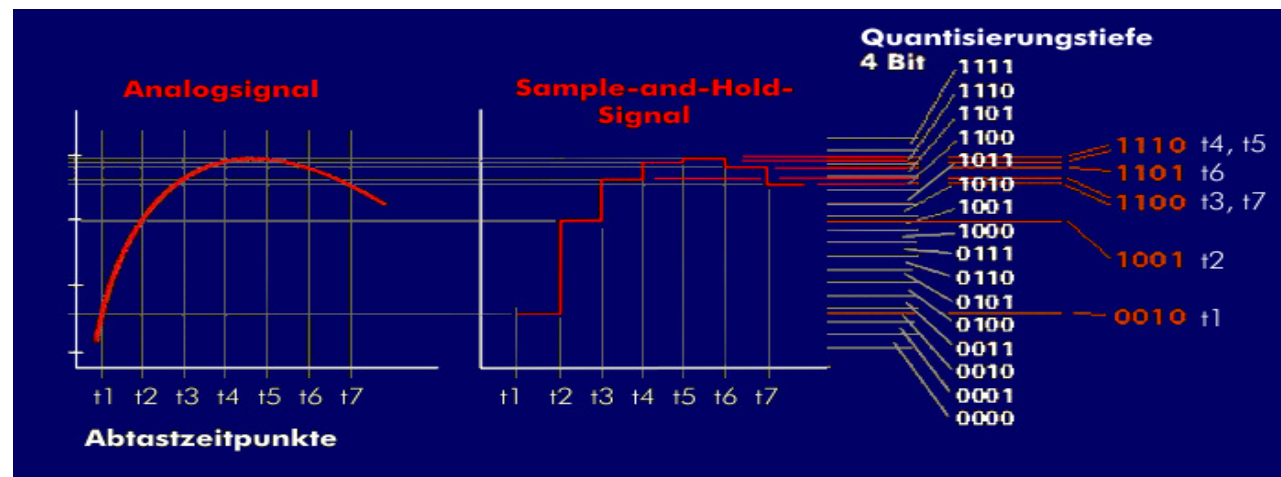
## Abtastung sampling

Unter Abtastung versteht man die Erfassung eines zeitkontinuierlichen analogen Signals in bestimmten Zeitabständen. Zu diesem Zweck wird das Analogsignal zu den Abtastzeitpunkten  $t_1$ ,  $t_2$  usw. abgetastet und der dabei erhaltene Spannungswert einer Halteschaltung zugeführt. Die Abtastung erfolgt in aller Regel gemeinsam mit der Spannungshaltung in einer *Abtast- und Halteschaltung*, Sample and Hold. Die Zeitabstände zwischen den einzelnen Abtastungen ist die *Abtastrate*.

Die zu einem bestimmten Zeitpunkt erfassten Werte stellen für den *AD-Wandler* die zu digitalisierenden Werte dar, die im AD-Wandler mittels *Quantisierung* digitalisiert werden.

## Abtastungen pro Sekunde S/s, samples per second

Die *Abtastrate* von *Abtast- und Halteschaltungen* und *A/D-Wandler* wird mit der Anzahl der *Abtastungen* in einer Zeiteinheit angegeben. Die Grundeinheit sind die Samples pro Sekunde (S/s). Ein Sample/second entspricht einer Abtastung in einer Sekunde.



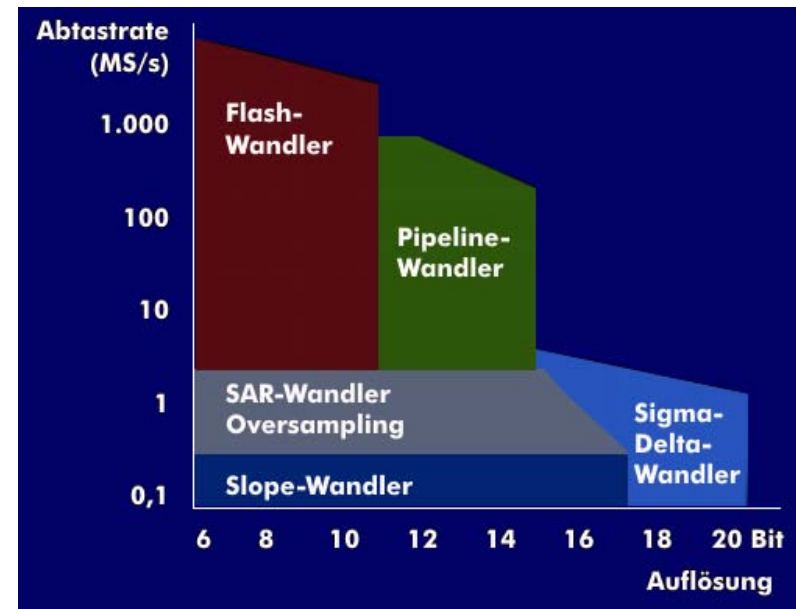
A/D-Wandlung mit einer Sampletiefe von 4 Bit

# A/D-Wandler

Aufbauend auf der Grundeinheit gibt es Kilosamples pro Sekunde (kS/s), das entspricht eintausend Samples pro Sekunde, oder Megsamples pro Sekunde (MS/s), das sind eine Million Samples pro Sekunde.

**AD-Wandler, A/D  
ADC, analog digital  
converter**

AD-Wandler (A/D, ADU, ADC) sind elektronische Schaltungen zur *Digitalisierung* von analogen Signalen. Sie arbeiten nach unterschiedlichen Wandlungsverfahren, bei denen ein kontinuierliches Analogsignal in der Amplitude und der Zeit quantisiert wird. AD-Wandler unterscheiden sich in der Art der *Quantisierung*, *Wandlungsgeschwindigkeit*, Codierung und



Einordnung von A/D-Wandlern nach der Abtastrate und der Auflösung

*Auflösung*, mit der sie analoge Signale digital nachbilden. Des Weiteren in der Wandlungslinearität, dem Nullpunkt- oder Offsetfehler und der *Quantisierungsfehler* sowie im *Signal-Rausch-Verhältnis* (SNR) und *Dynamikbereich*.

Da es sich bei den zu digitalisierenden Analogsignalen in aller Regel um sich ändernde Signale handelt, ist dem eigentlichen *DA-Wandler* ein *Abtast- und Halteglied* (S/H) vorgeschaltet. Die in der Abtast- und Halteschaltung (S/H) zwischengespeicherte Spannung wird anschließend im DA-Wandler quantifiziert und in mittels Dualsystem codiert.

# A/D-Wandler

Bekannte AD-Verfahren sind das *SAR-Verfahren* mit der sukzessiven Approximation, die Parallelumsetzung mittels *Flash-Wandler*, das *Zählverfahren*, der *Pipeline-Wandler*, das *Slope-Verfahren* und *Dual-Slope-Verfahren* und der *Sigma-Delta-Wandler*, auch bekannt als *1-Bit-Wandler*.

Hochgeschwindigkeits-Wandler erreichen *Abtastraten* von über 1 GS/s (Gigasample pro Sekunde) bei einer Auflösung von 10 Bit. Bei höherer Auflösung von 12 Bit und 14 Bit sinken die Abtastraten auf 5 MS/s bis 1 MS/s. Dem gegenüber erreichen hochauflösende A/D-Wandler Auflösungen von 24 Bit.

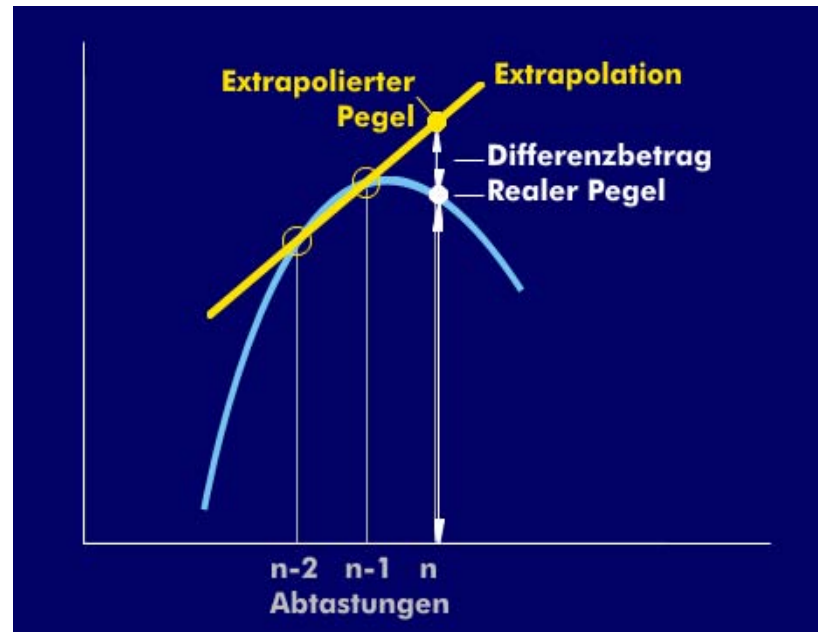
Weitere Parameter von AD-Wandlern sind die Leistungsaufnahme, die differentiellen Nichtlinearitäten (INL), der *SINAD-Wert*, der das Rauschen und die Verzerrungen umfasst, die Effective Number of Bits (*ENOB*) und der *Störspannungsabstand* (S/N), der 80 dB und höher sein kann.

Die Leistungsaufnahme ist technologieabhängig und liegt bei Verwendung der CMOS-Technologie bei 1 mW bis 2 mW. Hinsichtlich der Nichtlinearitäten werden unter Einbeziehung der integralen Nichtlinearität (INL) und der differentiellen Nichtlinearität (DNL) Werte von  $\pm 1$  LSB erreicht. Das bedeutet, dass der kleinste Bitwert um eine Stelle schwanken kann.

## ADPCM, adaptive delta pulse code modulation Adaptive Delta-Pulscodemodulation

Das ADPCM-Verfahren (Adaptive Delta Pulse Code Modulation) ist eine Pulscodemodulation mit einem Vorhersagemechanismus. Diese Prädiktion versucht die mögliche Signalform zu ermitteln und bildet daraus die Differenz mit dem tatsächlichen Signal. Da die Differenz zwischen diesen beiden Signalen geringer ist als das tatsächliche Signal, kann diese Differenz mit einer kleineren Bitzahl codiert werden. Das vorhergesagte Signal wird kontinuierlich an das tatsächlich vorhandene Signal angepasst. Die Anpassung des vorhergesagten Signals an

# A/D-Wandler



Abtastung beim ADPCM-Verfahren

das tatsächliche Signal erfolgt beim Eingangssignal, wodurch eine bessere Vorhersage als bei der *Differential Pulse Code Modulation* (DPCM) möglich ist. Das verlustbehaftete Kompression ADPCM reduziert das Datenaufkommen von Sprache und Musik von 64 kbit/s um mindestens 50% auf 32 kbit/s. Das ADPCM-Verfahren wurde 1986 als ITU-Standard G.721 spezifiziert und benutzt eine Extrapolation zwischen zwei benachbarten Abtastwerten mit einer gewissen Unsicherheit in der Vorhersage des folgenden Abtastwertes. Dem Verfahren nach wird bei der

ADPCM-Codierung zunächst das Eingangssignal linear quantisiert. Das resultierende Signal wird gewichtet und dient als Offset für die Vorhersage des Signalverlaufs. Codiert wird die Differenz zwischen dem tatsächlichen Abtastwert und einem extrapolierten Signalpegel, die auf den momentanen Unterschied in beiden Pegeln zurückzuführen ist. Der extrapolierte Pegel wird durch die beiden vorherigen Abtastwerte ermittelt. Der implementierte Algorithmus ist abhängig von den Eingangspegeln, der *Auflösung* und den Frequenzanforderungen. Ein in G.721 eingesetzter Algorithmus ist beispielsweise der IMA-Algorithmus von der Interactive Multimedia Association.



# A/D-Wandler

Details zu ADPCM legte die ITU-T in den Empfehlungen G.726 und G.727 für Sprachcodecs fest, in der Datenraten von 16, 24, 32 und 40 kbit/s vorgesehen sind.

Nach dem neuen ITU-Standard G.722 für breitbandige Sprachübertragung, bei dem ein Frequenzbereich von 50 Hz bis 7 kHz zugrunde gelegt wird - dieser würde bei normaler PCM-Technik 128 kbit/s zur Folge haben -, wird eine Kompression auf 64 kbit/s erzielt. Dieser Standard wird beispielsweise bei ISDN-Bildtelefonen angewendet.

Es gibt weitere ADPCM-Varianten, die vom Verfahren her gleich sind, allerdings nur mit 3 oder sogar nur mit 2 Bit zur *Digitalisierung* arbeiten.

## Auflösung resolution

Auflösung ist der kleinste unterscheidbare Unterschied zwischen zwei Zuständen, Pegeln, Farben, Tönen oder physikalische Größen.

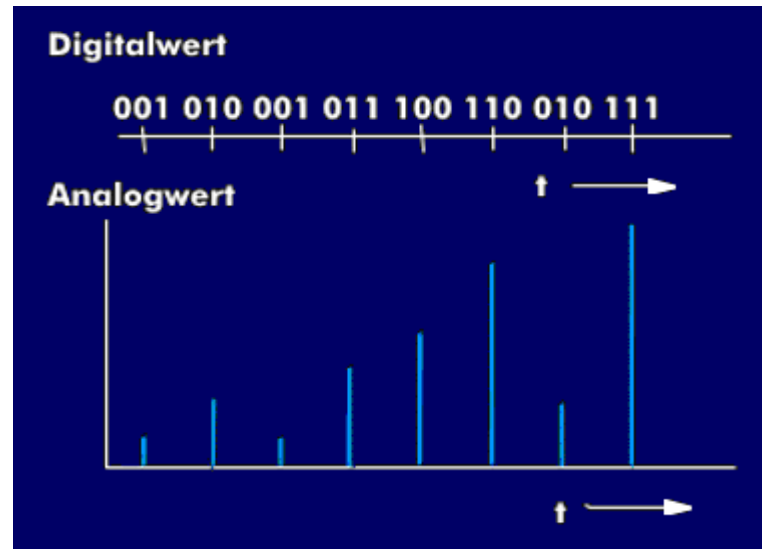
In der *Digitalisierung* ist die Auflösung das Maß für die Differenzierung physikalischer Unterschiede. So beispielsweise von der Helligkeit, dem Kontrast, der Farbsättigung, dem Farbton oder der Lautstärke. Die Auflösung wird beim *AD-Wandler* durch die *Quantisierung* bestimmt, mit *Sampletiefe* und damit die Anzahl der Bits pro *Abtastung* festgelegt wird.

## DA-Wandler, D/A DAC, digital to analoge converter

DA-Wandler (D/A) sind elektronische Schaltungen zur Umwandlung einer digital codierten Größe in einen analogen Strom- oder Spannungsverlauf. Der ideale DA-Wandler generiert aus dem binär anliegenden Eingangscode die analoge Ausgangsspannung, wobei zwischen beiden Größen ein linearer Zusammenhang besteht.

Die gesamte Umsetzung eines Digitalwortes in ein Analogsignal erfolgt in mehreren Stufen. Zuerst wird das Digitalwort im eigentlichen DA-Wandler in einzelne analoge Spannungswerte umgeformt. Für diese Wandlung werden *R-2R-Konverter*, Wandler mit *Pulsweitenmodulation*

# A/D-Wandler



Digital-Analog-Umsetzung

(PWM) oder andere benutzt. Die am Ausgang liegende Spannung hat einen treppenförmigen Verlauf. In der folgenden Stufe wird das treppenförmige Signal geglättet. Dies kann durch eine *Abtast- und Halteschaltung* (S/H) oder mit Filtern erfolgen. Das erneute Abtasten in einer Abtast- und Halteschaltung reduziert die Pulsbreite. Anschließend wird das stufenförmige Signal in einem Tiefpass rekonstruiert und geglättet, wobei dieser eine Grenzfrequenz haben muss, die der Hälfte der Samplingfrequenz entspricht.

Durch die Filterung werden die höheren Frequenzen und Oberwellen abgeschnitten, ebenso wie die Frequenzen, die um die *Abtastrate* herum vorhanden sind.

Wichtige Parameter von D/A-Wandlern sind u.a. die *Genauigkeit*, *Wandlungsgeschwindigkeit* und *Wandlungszeit* sowie der *Störspannungsabstand* und der *Klirrfaktor*.

Wie beim *AD-Wandler* ist auch beim D/A-Wandler der *Rauschabstand* abhängig von der Wortlänge des Digitalwortes, der Klirrfaktor hingegen von der *Linearität* des Wandlers.

Digitalisierung ist die Umwandlung von analogen Signalen in zweiwertige Digitalsignale. Für diese Umwandlungstechnik benutzt man *AD-Wandler*.

Die zu digitalisierenden Signale können beliebiger Herkunft sein. Es kann sich um Sprache,

# A/D-Wandler

Grafiken, Bilder, Audio oder Video handeln. Auch andere physikalische Größen wie Bewegung, Druck, Temperatur, Kraft, Beschleunigung usw. können nach der Umwandlung in ihr elektrisches Äquivalent digitalisiert werden.

Die Digitalisierung setzt eine elektrische Größe voraus, die sich während der Digitalisierung in ihren Werten nicht verändert. Deswegen werden die elektrischen Größen vor der Digitalisierung in ihren Momentanwerten abgetastet. Die *Auflösung* in Digitalwerte wird durch die *Quantisierung* erreicht.

## Digitizer Digitalisierer

Digitizer sind Komponenten für Computer mit denen der Benutzer analoge Signale oder Vorlagen digitalisieren kann. Solche Digitizer können als *AD-Wandler* für die rechnergestützte Messtechnik, die Daten- und Messwerterfassung sowie für die Umsetzung von Bildvorlagen genutzt werden.

Es gibt sie als Digitizer-Boards für Racks oder Computer aber auch als eigenständige Peripheriegeräte wie Scanner, Digitalkameras, Videokameras und Camcorder.

Die Digitizer-Technik zeichnet sich durch eine enorme Leistungsvielfalt aus. So erreichen mehrkanalige Digitizer-Boards *Abtastraten* von 10 GSample/s (GS/s) bei einer *Sampletiefe* von 18 Bit und mehr. Solche Digitizer werden in der Sensorik, der Hochgeschwindigkeits-Datenerfassung und -protokollierung eingesetzt.

Digitizer können für Systembusse und Feldbusse konzipiert sein und darüber gesteuert werden. Ebenso kann der Anschluss drahtlos über ein WLAN oder Bluetooth erfolgen. Die für die Messtechnik konzipierten Digitalisierer arbeiten mit PCI Extension for Instrumentation (PXI).

# A/D-Wandler

## DPCM, differential pulse code modulation

### Differenzielle Pulscodemodulation

Bei der differenziellen Pulscodemodulation (DPCM) handelt es sich um ein verlustbehaftetes Codierverfahren, bei dem der Differenzbetrag von zwei aufeinander folgenden Abtastwerten codiert wird. Dabei wird aus vergangenen Samplewerten ein Prädiktor berechnet, der vom aktuellen Samplewert abgezogen und dessen Prädiktionsfehler übertragen wird. Empfangsseitig wird ebenfalls aus vergangenen rekonstruierten *Abtastungen* ein Prädiktor errechnet und mit dem übertragenen Prädiktionsfehler korrigiert. Im Gegensatz zu DPCM arbeitet *ADPCM* (Adaptive Delta Pulse Code Modulation) ebenfalls mit Prädiktion, passt aber das prädiktive Signal an das Eingangssignal an, wodurch eine bessere Vorhersage möglich ist. Das Verfahren wird in der Sprachdigitalisierung angewendet und hat den Vorteil, dass zur Codierung eines Abtastwertes wesentlich weniger Bits benötigt werden, was zu einer wesentlichen Datenreduzierung führt. Bei diesem Verfahren können bei großen Differenzen zwischen benachbarten Abtastwerten Fehler auftreten. Diese können dadurch behoben werden, indem man nach einigen Abtastungen wieder den vollen Amplitudenwert anstelle des Differenzwertes abtastet.

Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass ein Pegelverlust von 6 dB/Oktave entsteht und dadurch das *Signal-Rausch-Verhältnis* (SNR) um 6 dB/Oktave sinkt und hohe Töne schlechter übertragen werden.

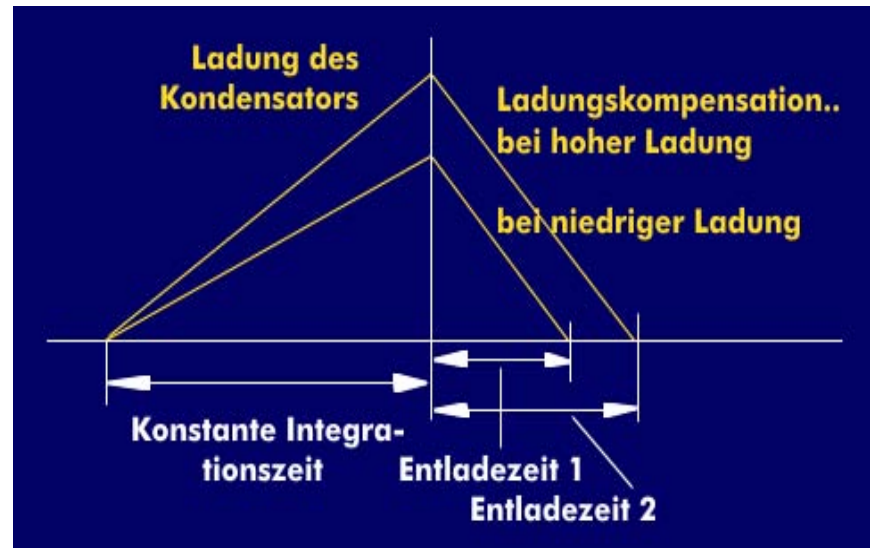
## Dual-Slope-Verfahren dual slope methode

Für die *Digitalisierung* von analogen Signalen gibt es mehrere Wandlerverfahren, die sich in der *Wandlungsgeschwindigkeit* und der *Auflösung* unterscheiden. Das *Dual-Slope-Verfahren* ist ein abgewandeltes Slope-Verfahren und gehört zu den langsameren Verfahren der *A/D-Wandler*.

Bei diesem Verfahren wird ein Kondensator während einer konstanten Integrationszeit von der



# A/D-Wandler



Funktionsweise des Dual-Slope-Verfahrens

analogen Eingangsspannung aufgeladen. Die Ladung des Kondensators steht damit in einem festen Verhältnis zur Eingangsspannung. Nach Abschluss der Integrationszeit wird eine Gegenspannung an den Integrator gelegt, die diesen zeitproportional bis auf null Volt entlädt. Hat der Kondensator eine hohe Spannung, ist die Entladezeit länger, bei einer geringeren Spannung ist sie kürzer. Die Entladezeit ist also ein Maß für

die Eingangsspannung. Während der Entladezeit werden Taktimpulse zu einer *GLUE-Logik* mit Zähler geleitet, der sie zählt und daraus den Wert für die Eingangsspannung ableitet. A/D-Wandler, die nach dem Dual-Slope-Verfahren arbeiten, sind relativ langsam und werden in Digitalmultimetern eingesetzt. Ihre *Genauigkeit* liegt bei  $10 \times 10^{-4}$ . Für die *Digitalisierung* von analogen Signalen gibt es mehrere Wandlerverfahren, die sich in der *Wandlungsgeschwindigkeit* und der *Auflösung* unterscheiden. Das *Dual-Slope-Verfahren* ist ein abgewandeltes Slope-Verfahren und gehört zu den langsameren Verfahren der *A/D-Wandler*. Bei diesem Verfahren wird ein Kondensator während einer konstanten Integrationszeit von der analogen Eingangsspannung aufgeladen. Die Ladung des Kondensators steht damit in einem festen Verhältnis zur Eingangsspannung. Nach Abschluss der Integrationszeit wird eine

# A/D-Wandler

Gegenspannung an den Integrator gelegt, die diesen zeitproportional bis auf null Volt entlädt. Hat der Kondensator eine hohe Spannung, ist die Entladezeit länger, bei einer geringeren Spannung ist sie kürzer.

Die Entladezeit ist also ein Maß für die Eingangsspannung. Während der Entladezeit werden Taktimpulse zu einer *GLUE-Logik* mit Zähler geleitet, der sie zählt und daraus den Wert für die Eingangsspannung ableitet.

A/D-Wandler, die nach dem Dual-Slope-Verfahren arbeiten, sind relativ langsam und werden in Digitalmultimetern eingesetzt. Ihre *Genauigkeit* liegt bei  $10 \times 10^{-4}$ .

## ENOB, effective number of bits

Die effektive Anzahl der Bits (ENOB) ist ein Kennwert von *A/D-Wandlern*, der dessen tatsächliche *Genauigkeit* und Leistungsfähigkeit besser charakterisiert als die *Auflösung*. Bei einem Sinus können zur Bestimmung des ENOB-Wertes 1,76 dB vom *SINAD-Wert* (dB), der das Rauschen und die Verzerrungen enthält, subtrahiert und das Ergebnis durch den Quotienten 6,02 dividiert werden. Für einfache Überschlagrechnungen kann der SINAD-Wert durch Faktor 6 dividiert werden. Nach dieser Formel hat ein 24-Bit-Wandler mit einem angenommenen SINAD (Signal to Noise and Distortion) von 110 dB einen ENOB von 16,6. Dieser Wert, der weit entfernt ist von der Auflösung von 24 Bit, hat eine höhere Aussagekraft in Bezug auf die effektive Anzahl der genutzten Bits.

## Flash-Wandler flash converter

Flash-Konverter sind *A/D-Wandler* bei denen alle logischen Entscheidungen parallel ausgeführt werden. Sie entsprechen den Parallelumsetzern und zeichnen sich durch eine schnelle *Wandlungsgeschwindigkeit* aus, die nur einen Taktzyklus kurz ist.

Bei den Flash-Wandlern wird das zu digitalisierende analoge Eingangssignal parallel an viele

# A/D-Wandler

Komparatoren geführt, wo mit den von mehrstufigen Spannungsteilern erzeugten Referenzspannungen verglichen wird. Für jeden möglichen Ausgangswert ist ein eigener Komparator erforderlich, das bedeutet, dass die Anzahl der Komparatoren von der *Auflösung* abhängt und „ $2^{\text{expn}} - 1$ “ entspricht. Das bedeutet, dass ein Flash-Konverter mit einer Auflösung von 4 Bit aus 15, einer mit 8 Bit Auflösung aus 255 Komparatoren besteht. Jeder Komparator wird mit einer eigenen Referenzspannung versorgt und wird mit einem diskreten Übertragungswert verglichen. Dieser Übertragungswert wird in *geringwertigste Bits* (LSB) abgestuft, die sich aus dem Aussteuerbereich (Full Scale) dividiert durch  $2^{\text{expn}}$  ergeben. Die Komparatorausgänge repräsentieren gleichzeitig „ $2^{\text{expn}} - 1$ “ diskrete digitale Zustände, deren Pegel codiert und digitalisiert werden.

## Genauigkeit *accuracy*

Die Genauigkeit ist der prozentuale Wert einer Abweichung in Bezug zum Sollwert. Die Genauigkeit ist ein dimensionsloser Wert, der in Prozent angegeben wird. Der Begriff Genauigkeit kommt in vielen technischen Anwendungen vor; in der Mechanik und in der Konstruktion, der Elektronik, Mess- und Nachrichtentechnik, der Analog- und Digitaltechnik. Es handelt sich aber immer um die Toleranzgrenzen von technischen Parametern oder Kenngrößen. Ermittelt wird die Genauigkeit aus dem Quotienten der Abweichung und dem Sollwert. Beträgt beispielsweise die Abweichung 1 und ist der Sollwert 100, dann ist die Genauigkeit 99%.

## Iteration *Wiederholung*

Iteration ist eine konsequente, wiederholte Annäherung an einen Wert oder ein Ergebnis. Die Technik der Iteration wird bei *D/A-Wandlern* eingesetzt. Technisch handelt es sich um eine Rückkopplungstechnik, bei der das Ergebnis eines Schrittes

# A/D-Wandler

$$K (\%) = \frac{\sum \text{Oberwellen}}{\text{Grundwelle}} \times 100$$

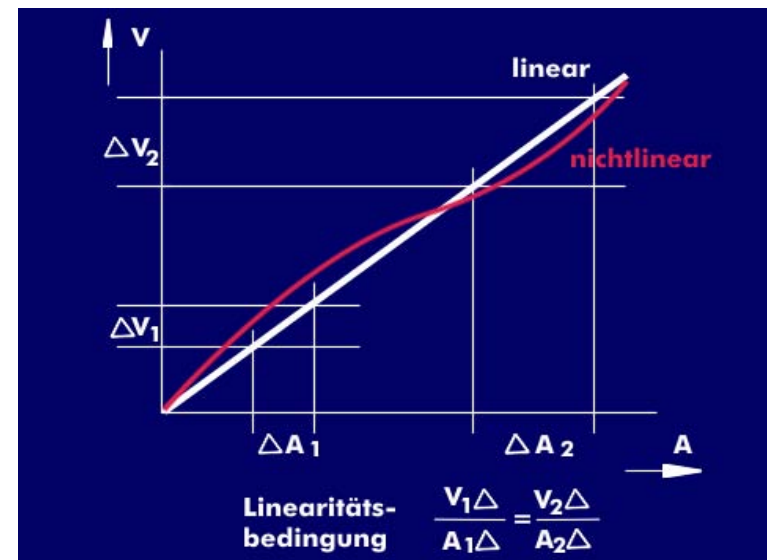
Berechnung des Klirrfaktors

Da mit der Iteration eine schnelle Annäherung an den exakten Wert erfolgen kann, wird diese Methode zur Näherung benutzt.

als Ausgangswert für die folgende Iteration benutzt wird. Dieses Verfahren wird solange weitergeführt, bis das Endergebnis mögliche Toleranzabweichungen nicht unterschreitet und damit nicht weiter verbessert werden kann.

**Klirrfaktor**  
*THD, total harmonic distortion*

Der Klirrfaktor (THD) ist ein Maß für die Verzerrungsfreiheit von Audiosignalen. Es handelt sich um eine nichtlineare, frequenzabhängige Verzerrung, die aus dem Verhältnis von Oberwellen



Linearitätszusammenhang

zur Grundwelle berechnet und in Prozent oder Dezibel angegeben wird.

Er berechnet sich aus dem Logarithmus der Spannungsverhältnisse der Harmonischen. Wobei der Quotient aus den quadratischen Mittelwerten der Oberwellen zu den quadratischen Mittelwerten der Harmonischen, also einschließlich der Grundwelle, gebildet wird.

Der Klirrfaktor wird gleichermaßen von der Aufnahme-, der Speicher- und der Wiedergabe-Elektronik beeinflusst. So von passiven und aktiven Komponenten der



# A/D-Wandler

Audiokette, dem Mikrofon, Vorverstärker, Audio-Bandgeräte, Leistungsverstärker und Lautsprecher.

Neben dem THD-Wert gibt es auch noch den THD+N-Wert in den auch das Grundrauschen der Audio-Komponenten eingeht.

## Linearität *linearity*

Die in diesem Kontext behandelte Linearität bezieht sich auf die Zusammenhänge von physikalischen Größen aus der Elektronik.

Eine Linearität von physikalischen Größen wie Spannungen oder Strömen ist dann gegeben, wenn sich eine Ausgangsgröße vollkommen proportional zur Eingangsgröße verhält, jede Eingangsspannungsänderung hat eine proportionale Ausgangsstrom- oder Ausgangsspannungsänderung zur Folge. Dabei ist es wichtig, dass die Änderungen nicht von dem absoluten Pegel abhängen, sondern dass bei einem niedrigen Pegel die gleiche Änderung entsteht, wie bei einem hohen.

Bewirkt beispielsweise eine Eingangsspannungsänderung von 1 V eine Ausgangsstromänderung von 100 mA, dann muss eine Eingangsspannungsänderung von 2,5 V eine Ausgangsstromänderung von 250 mA zur Folge haben. In diesem Fall ist die Änderung linear, bei jeder anderen Ausgangsstromänderung wäre sie hingegen nichtlinear.

Grafisch zeigt sich die Linearität als Abweichung von einer idealen Geraden.

## LSB, least significant bit *Geringwertigstes Bit*

Das geringwertigste Bit (LSB) ist das Bit in einer Gruppe von zusammengehörigen Bits, z.B. einem Byte, das in dem binären Stellenwertsystem die geringste Wertigkeit besitzt.

Bei den Least Significant Byte spricht man auch von Byte Reversal.

# A/D-Wandler

## MSB, most significant bit Hochwertigste Bit

Unter dem Most Significant Bit (MSB) versteht man das Bit mit der höchsten Wertigkeit in der binären Darstellung eines numerischen Wertes. Das Gegenteil ist *Least Significant Bit* (LSB), das die geringste Wertigkeit hat.

Das Most Significant Bit steht in der binären Schreibweise immer ganz links.

## OSR, oversampling ratio

Bei der *Digitalisierung* von analogen Signalen spielt das Abtasttheorem eine entscheidende Rolle, weil es den Zusammenhang von *Abtastrate* und reproduzierbarer Signalfrequenz festlegt. Danach ist das Theorem dann erfüllt, wenn die Abtastrate mindestens doppelt so hoch ist, wie die zu digitalisierende Signalfrequenz. Ist die Abtastrate höher als die durch das Abtasttheorem festgelegte, dann spricht man von *Überabtastung*, bzw. Oversampling. Der Überabtastfaktor, das Oversampling Ratio (OSR), gibt den Faktor an, um den die Abtastrate höher ist als die Abtastrate, die das Abtasttheorem erfüllt.

Bei der Digitalisierung von Audio wird das Abtasttheorem durch eine Abtastfrequenz von über 40 kHz erfüllt, wird das Audiosignal aber beispielsweise mit 80 kHz abgetastet, dann ist der OSR-Faktor 2.

## Oversampling Überabtastung

Die Informationstiefe eines A/D- oder D/A-Wandlers ist das Produkt aus der Samplingrate und der *Quantisierung*. Erhöht man die Samplingrate, kann die *Digitalisierung* reduziert werden, ohne dass die Informationstiefe beeinträchtigt wird. Diese Grundüberlegung ist ein Aspekt für das Oversampling. Ein anderer hängt mit den Problemen der Filterung und Signalglättung zusammen.

Nach dem Abtasttheorem muss bei der Digitalisierung einer Frequenz diese mit mindestens der doppelten *Abtastrate* abgetastet werden. Beispielsweise beträgt bei CDs die Abtastrate

# A/D-Wandler

1.	011				011				011
2.	011	011	011	011	011	011	011	011	011
3.	+000	+011	+110	+001	+100	+111	+010	+101	+000
4.	011	110	001	100	111	010	101	000	011
5.	0	0	1	0	0	1	0	1	0
<b>1. Normale Abtastung mit einem angenommenen Digitalwert 010</b> <b>2. Auffüllen der zusätzlichen Abtastwerte für das 4-fache Oversampling</b> <b>3. Addition der Cut-off-Bits zum folgenden Bit</b> <b>4. Addition von 2. und 3. und Streichung der letzten 3 Bits</b> <b>5. Überlaufwerte für die Berechnung</b>									

*Vierfaches Oversampling durch Einfügen von Digitalwerten*

44,1 kHz, was eine maximale Audiofrequenz von 22,05 kHz zur Folge hat. Damit die Oberwellen- und Mischprodukte bei einer solchen Abtastfrequenz das Signal nicht beeinträchtigen, muss der Audibereich mit Filtern, die eine hohe Flankensteilheit haben, von den Mischprodukten aus der Taktfrequenz getrennt werden. Dies verursacht

Probleme, da Filter mit hoher Flankensteilheit Phasenverschiebungen im oberen Frequenzbereich verursachen.

Aus diesem Grund vervielfacht man die Samplingfrequenz und kann dadurch normale Filter mit geringerer Flankensteilheit einsetzen. Hinzu kommt, dass durch das Oversampling das treppenförmige Signal geglättet wird. So könnten beispielsweise bei einer zehnfach höheren Abtastrate pro Treppenstufe zehn weitere Zwischenwerte interpoliert werden. Das Analogsignal würde dadurch stufenloser und anschließend in einem Tiefpass weiter geglättet. Die Wiedergabe der analogen Signale wird durch den Tiefpass auf den Wiedergabebereich begrenzt.

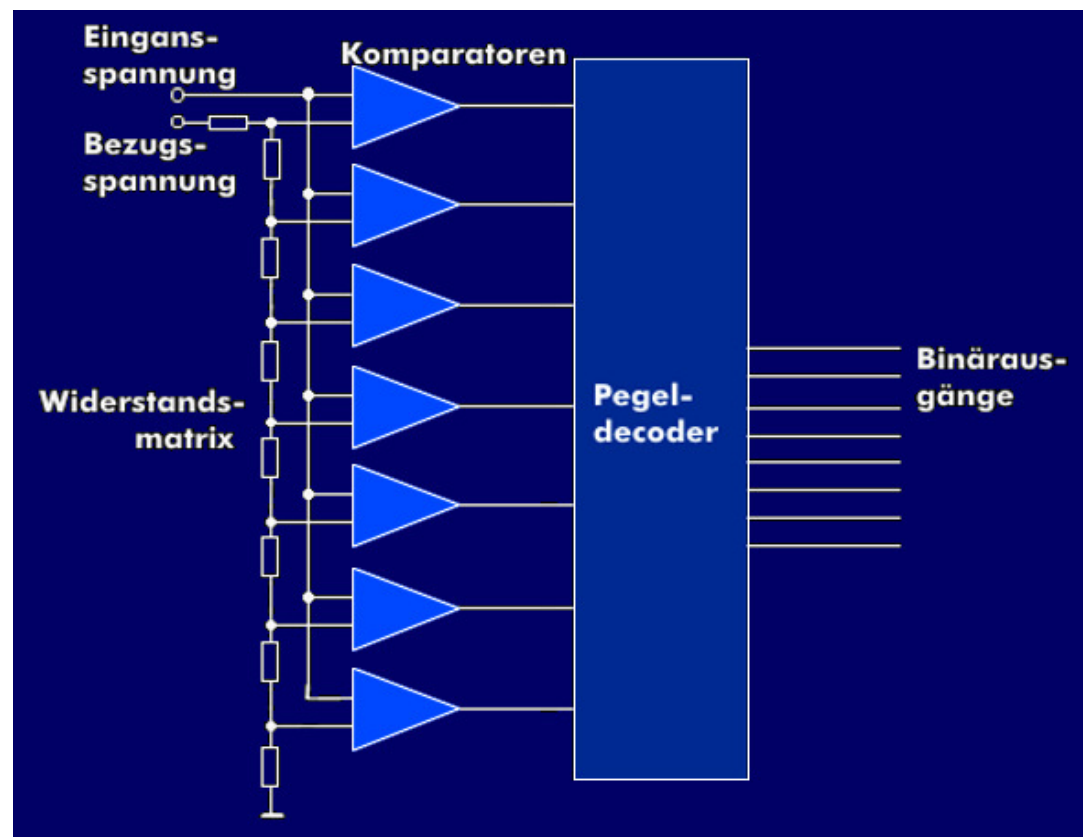
Bei D/A-Wandler wird mit dem Oversampling eine Interpolation zwischen zwei vorhandenen

# A/D-Wandler

Digitalwörtern erzielt. Zu diesem Zweck werden zusätzliche Digitalwörter zwischen die vorhandenen eingefügt. Wird beispielsweise der Eingang eines A/D-Wandlers mit 44,1 kHz getaktet, dann werden bei einem 4-fachen Oversampling drei neue Samples eingefügt und die Taktfrequenz erhöht sich auf 176,4 kHz. Der schnellere Samplestrom wird durch ein

Digitalfilter geführt wobei die eingefügten Samples mit den Original-Datenwörtern interpoliert werden. Das Analogsignal wird mit einem D/A-Wandler, der mit 4-facher Abtastrate arbeitet, rekonstruiert und über ein Wandlung einfaches Filter ausgefiltert.

Parallelumsetzer  
*parallel converter*



Aufbau eines Parallelumsetzers mit drei Bit Auflösung

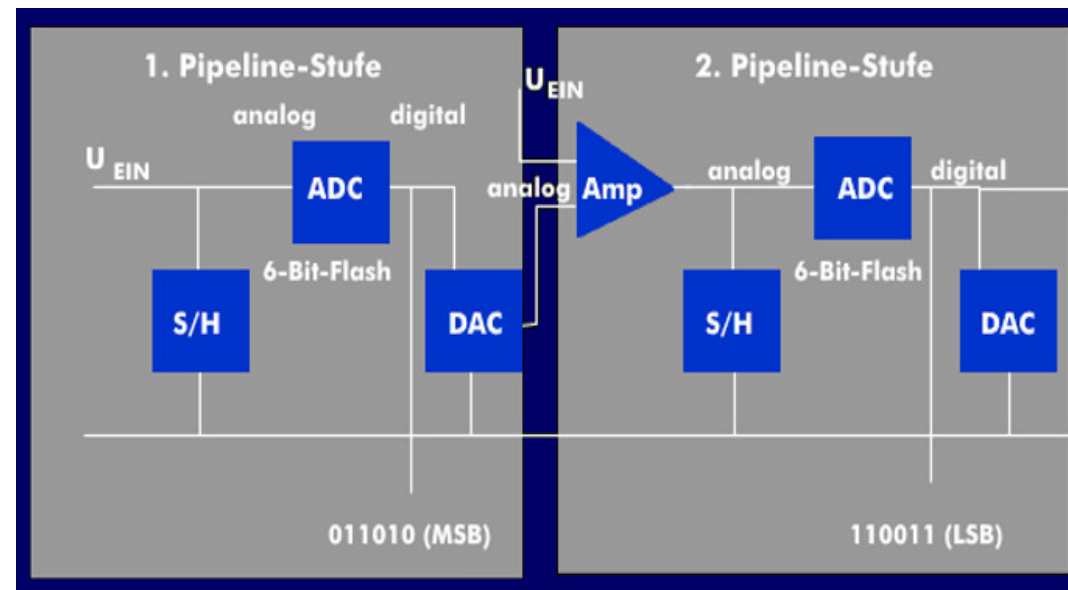
Parallelumsetzer, auch bekannt als *Flash-Wandler*, sind A/D-Wandler mit bitparalleler Umsetzung. Gegenüber dem *SAR-Verfahren* mit der sukzessiven



# A/D-Wandler

Approximation haben sie den Vorteil, dass sie wesentlich schneller sind und nur ein Taktsignal für die Umsetzung benötigen.

Parallelumsetzer bestehen aus vielen Komparatoren und einer entsprechenden Anzahl an Spannungsteilern. Die Eingangsspannung wird an alle Komparatoren gelegt. An den zweiten Eingang der Komparatoren wird die jeweils aus dem Spannungsteiler abgeleitete Referenzspannung gelegt. Bei einem Dualcode von 3 Bit, muss der Eingangsspannungsbereich in  $2^{\text{exp}3}$ , also 8 Quantisierungsintervalle aufgeteilt werden. Dazu sind sieben Komparatoren und Spannungsteiler erforderlich. Die Logikpegel der Komparatoren werden durch Codeumwandlung in die Zahl „3“ umcodiert, bevor sie in den Binärcode gewandelt werden.



Aufbau eines zweistufigen Pipeline-Wandlers mit 6-Bit-Flash-Wandlern

Die Anzahl der Komparatoren und der Spannungsteiler ist abhängig von der *Auflösung* des Parallelumsetzers und errechnet sich aus  $2^{\text{exp}2-1}$ . Ein D/A-Wandler mit einer Auflösung von 5 Bit besteht somit aus 31 Komparatoren, einer mit 8 Bit Auflösung aus 255 und einer mit 16 Bit aus 65.535 Komparatoren.

# A/D-Wandler

Jeder Komparator erhält über die Widerstandsmatrix seine eigene Bezugsspannung. Da sich die *Genauigkeit* der Spannungsteiler unmittelbar auf die Genauigkeit der D/A-Umsetzung auswirkt, übersteigt die Auflösung von Parallelumsetzern, auch als Flash-Konverter bezeichnet, selten mehr als 10 Bit. Dafür ist die *Wandlungsgeschwindigkeit* sehr hoch, weil für die volle Auflösung nur ein Taktimpuls benötigt wird.

## Pipeline-Wandler *pipeline converter*

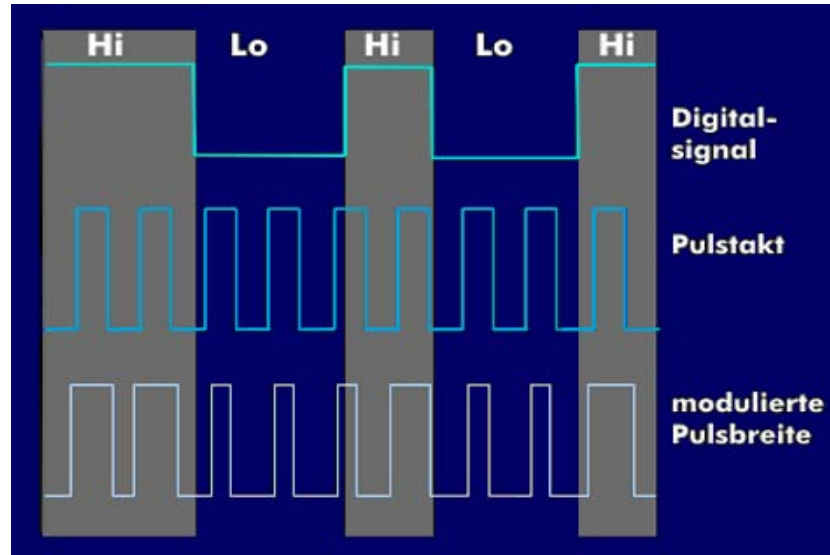
Pipeline-Wandler sind mehrstufige *A/D-Wandler*, die aus mehreren *Flash-Wandlern* bestehen. Ihre Vorteile liegen in der hohen *Auflösung*, die bis zu 14 Bit reicht und der hohen *Abtaste*, die 100 MHz und mehr betragen kann.

Vom Aufbau her handelt es sich beim Pipeline-Wandler um eine Kaskadierung von mehreren Flash-Wandlern. Jeder einzelne *Parallelumsetzer* quantisiert das Differenzsignal des vorgeschalteten A/D-Wandlers. Der erste A/D-Wandler erhält das zu digitalisierende Eingangssignal, quantisiert es und stellt die höherwertigen Bits des digitalen Ausgangs dar. Das digitale Ausgangssignal wird in einem *D/A-Wandler* in ein analoges Signal gewandelt, in einer *Abtast- und Halteschaltung* zwischengespeichert, von dem originalen Eingangssignal subtrahiert und nach einer Verstärkung dem nächsten Parallelumsetzer zugeführt, der das Differenzsignal mit höherer Auflösung quantisiert. Die weiteren nachgeschalteten A/D-Wandler quantisieren jeweils das nächste Differenzsignal und zwar mit immer höherer Auflösung. Nach dem Durchlauf aller Pipeline-Stufen wird das Ergebnis errechnet.

Die hohe *Dynamik* des Pipeline-Wandlers erfordert eine hohe *Linearität* der einzelnen A/D-Wandler und präzise Verstärker, die das Differenzsignal zwischen den Pipeline-Stufen verstärken. Pipeline-Wandler erreichen höhere Auflösungen als Flash-Wandler mit einer vergleichbaren Anzahl an Komparatoren, was allerdings auf Kosten der *Wandlungszeit* geht.

# A/D-Wandler

## Pulsweitenmodulation PWM, pulse width modulation



Mit einem Digitalsignal modulierte Pulsbreite

Da aber jede Pipeline-Stufe den Wandlungswert in der Abtast- und Halteschaltung festhält, können mehrere Zyklen gleichzeitig stattfinden, was die Wandlungsgeschwindigkeit relativiert.

Bei der Pulsweitenmodulation (PWM) wird ein Rechtecksignal in seiner Pulsweite moduliert, die Pulsfrequenz bleibt konstant. Dadurch ändert sich das Tastverhältnis im Rhythmus der Modulationsfrequenz.

Diese Modulationsart wird auch als Pulslängen- oder Pulsdauermodulation bezeichnet und u.a. in *D/A-Wandlern*, der Telemetrie, der Leistungselektronik zur Steuerung von Elektromotoren und Dimmern und auch in optischen Sendern eingesetzt. Bei diesen repräsentiert beispielsweise ein breiter Lichtimpuls eine logische „1“, ein schmaler Lichtimpuls eine logische „0“. Der Lichtpegel ist bei beiden logische Zuständen gleich.

Bei der D/A-Wandlung wird die Pulsbreite und damit das Tastverhältnis durch den Digitalwert bestimmt. Der Mittelwert des Tastverhältnisses entspricht der analogen Ausgangsspannung.

## Quantisierung quantization

Die Quantisierung ist ein Teil der *Digitalisierung* von analogen Signalen. Dazu werden die analogen Signale in regelmäßigen Abständen mit der *Abtastrate* abgetastet (*Sampling*) und zu

# A/D-Wandler

Codewort- länge (Bit)	Quantis. stufen	Fehler (%)	Rausch- abstand (dB)
4	16	6,250	24,1
6	64	1,562	36,1
8	256	0,396	48,1
10	1.024	0,097	60,2
12	4.096	0,0244	72,2
14	16.384	0,0061	84,3
16	65.536	0,01529	96,3
18	262.144	0,00381	108,3

*Quantisierungsfehler und Rauschabstand bei bestimmten Quantisierungsstufen*

der *Dynamikbereich* und desto geringer ist der mögliche prozentuale *Quantisierungsfehler* in Bezug auf das Originalsignal.

jedem dieser Abtastzeitpunkte wird ihr Spannungswert in einen Digitalwert umgewandelt. Das Analogsignal kann nur in einer endlichen Anzahl von Digitalwerten ausgedrückt werden.

Diese Umwandlung in Zahlen und messbaren Größen nennt man

Quantisierung. So kann ein Analogwert mit einer *Sampletiefe* von beispielsweise 4 Bit, 8 Bit, 16 Bit, 24 Bit oder 32 Bit dargestellt werden, was einer Quantisierung von 16, 256, 65.536, 16.777.216 oder  $4,295 \times 10^9$  unterschiedlichen Pegeln entspricht. Je höher die Quantisierung, desto höher ist

## Quantisierungsfehler *quantization error*

Bei der Rückwandlung eines quantisierten Signals, also eines Digitalsignals in ein Analogsignal, ergeben sich Quantisierungsfehler, die abhängig sind von der Anzahl der Bits des Digitalsignals. Das Analogsignal weist durch die Quantisierungsverzerrungen keine Kontinuität auf, sondern ist je nach Bitzahl mehr oder weniger treppenförmig.

Je höher die *Quantisierung* ist, desto geringer ist der Quantisierungsfehler, der sich bei der Wiedergabe von Audiosignalen als Quantisierungsrauschen bemerkbar macht. Bei 4-Bit-



# A/D-Wandler

Quantisierung beträgt der *Dynamikbereich* 24,08 dB und der maximale Quantisierungsfehler 6,25 %. Bei 8 Bit ist die Dynamik 48,16 dB und der max. Quantisierungsfehler 0,39 %, bei 16 Bit sind es 96,3 dB und 0,015 % und bei 24 Bit beträgt die maximale Dynamik 144,5 dB und der mögliche Quantisierungsfehler  $0,056 \times 10^{\exp-6}$ . Dieser Quantisierungsfehler drückt sich bei der Wiedergabe von Audiosignalen durch ein Rauschen aus, das Quantisierungsrauschen.

## R-2R-Konverter R-2R converter

Der R-2R-Konverter ist ein *D/A-Wandler*, der eine Widerstand-Matrix als Spannungsteiler benutzt. Die einzelnen Widerstände der Matrix werden für die Umwandlung mit elektronischen Schaltern zu- und abgeschaltet. Die Ausgangsspannung ist dabei proportional dem binären Digitalsignal.

Im Gegensatz zu dem gewichteten Widerstands-Konverter, bei dem die Widerstandswerte das 2-, 4-, 8- und 16-fache des Basiswiderstands entsprechen, gibt es beim R-2R-Konverter nur zwei Widerstandswerte „R“ und „2R“. Letztere allerdings mehrfach, da daraus die Spannungsteilung für den 4-, 8- und 16-fachen Wert erstellt werden. Dies geschieht indem man mehrere Widerstände gleichzeitig in den Spannungsteiler zu- oder abschaltet. Der R-2R-Konverter ist der am häufigsten benutzte D/A-Wandler.

## Sampletiefe sampling depth

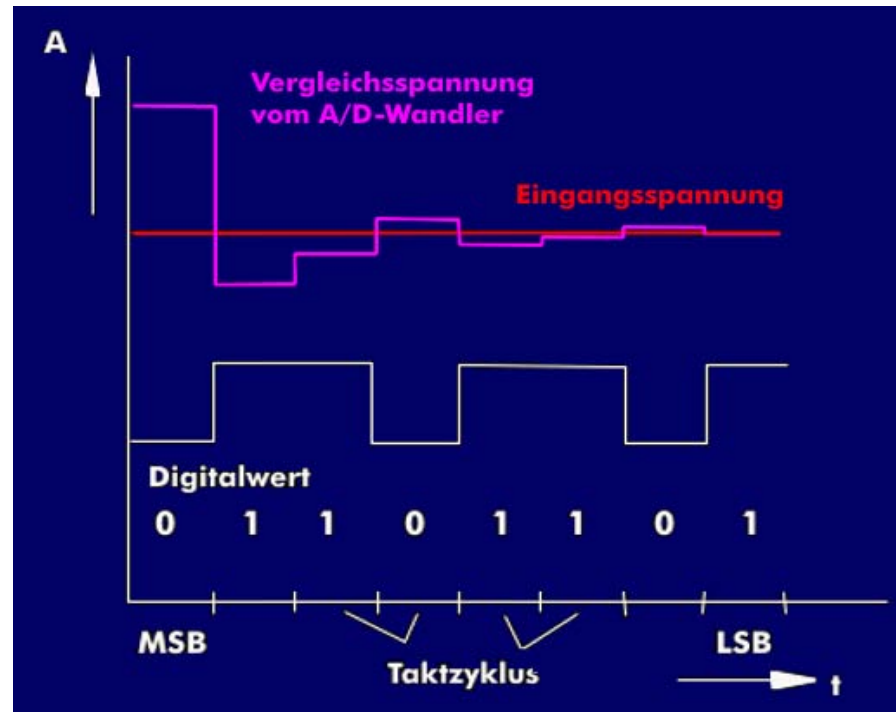
Die Sampletiefe ist die Digitalisierungstiefe, auch *Quantisierung* genannt, für einen abgetasteten Momentanwert. Beim *Sample and Hold* werden Proben von analogen Signalen entnommen, die dann mittels *A/D-Wandler* in Digitalwerte umgesetzt werden. Diese Proben können mit einer bestimmten Bitzahl quantisiert werden. Das bedeutet, dass aus der analogen Spannungsprobe mittels *Digitalisierung* ein Digitalwert gebildet wird, der in seiner Digitalisierungstiefe 4, 8, 12, 16, 24 oder 32 Bit haben kann. Die Sampletiefe bestimmt die

# A/D-Wandler

digitale *Auflösung* und die mögliche *Genauigkeit* bei der Signalreproduktion.

## SAR, successive approximation register SAR-Verfahren

Das SAR-Verfahren der sukzessiven Approximation, ist ein Verfahren, das in *A/D-Wandlern* für die Umsetzung des Analogsignals in ein Digitalsignal benutzt wird. Es basiert auf dem Vergleich der analogen Eingangsspannung mit einer Referenzspannung und wird auch als Wägeverfahren bezeichnet. Dieser Vergleich wiederholt sich schrittweise, wobei sich die Referenzspannung durch ständige Änderung an die Eingangsspannung annähert. Für jeden



Prinzip der sukzessiven Approximation

Schritt, also jeden neuen Vergleich, ist jeweils ein eigener Taktzyklus erforderlich. Das bedeutet, dass für eine sukzessive Approximation mit einer *Auflösung* von 12 Bit, 12 Taktzyklen erforderlich sind.

Der Vergleich zwischen der Eingangsspannung und der Referenzspannung erfolgt in einem Komparator.

Ist beispielsweise beim ersten Schritt die Eingangsspannung des A/D-Wandlers niedriger als die Vergleichsspannung, dann wird das *Most Significant Bit* (MSB) auf den Lo-Wert (0) gesetzt, andernfalls auf

# A/D-Wandler

den Hi-Wert (1), und die Referenzspannung wird halbiert. Der erneute Vergleich für das nächste Bit zeigt, dass die Referenzspannung niedriger ist als die Eingangsspannung und das folgende Bit wird auf „1“ gesetzt, die Referenzspannung wird erneut halbiert und wiederum verglichen und so geht es zyklisch weiter bis alle Bits gesetzt sind, bis zum *Least Significant Bit* (LSB). Die Anzahl der gesetzten Bits ist das Maß für die Auflösung. Das SAR-Verfahren der sukzessiven Approximation, ist ein Verfahren, das in *A/D-Wandlern* für die Umsetzung des Analogsignals in ein Digitalsignal benutzt wird. Es basiert auf dem Vergleich der analogen Eingangsspannung mit einer Referenzspannung und wird auch als Wägeverfahren bezeichnet. Dieser Vergleich wiederholt sich schrittweise, wobei sich die Referenzspannung durch ständige Änderung an die Eingangsspannung annähert. Für jeden Schritt, also jeden neuen Vergleich, ist jeweils ein eigener Taktzyklus erforderlich. Das bedeutet, dass für eine sukzessive Approximation mit einer *Auflösung* von 12 Bit, 12 Taktzyklen erforderlich sind. Der Vergleich zwischen der Eingangsspannung und der Referenzspannung erfolgt in einem Komparator.

Ist beispielsweise beim ersten Schritt die Eingangsspannung des A/D-Wandlers niedriger als die Vergleichsspannung, dann wird das *Most Significant Bit* (MSB) auf den Lo-Wert (0) gesetzt, andernfalls auf den Hi-Wert (1), und die Referenzspannung wird halbiert. Der erneute Vergleich für das nächste Bit zeigt, dass die Referenzspannung niedriger ist als die Eingangsspannung und das folgende Bit wird auf „1“ gesetzt, die Referenzspannung wird erneut halbiert und wiederum verglichen und so geht es zyklisch weiter bis alle Bits gesetzt sind, bis zum *Least Significant Bit* (LSB). Die Anzahl der gesetzten Bits ist das Maß für die Auflösung.

# A/D-Wandler

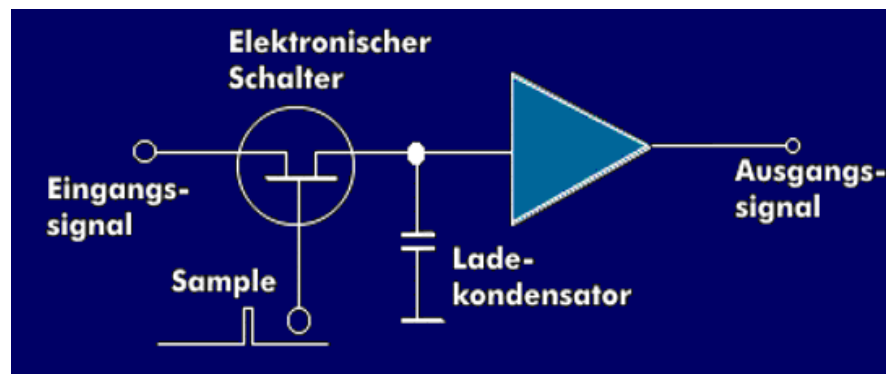
## SFDR, spurious-free dynamic range

Das Akronym SFDR (Spurious-Free Dynamic Range) wird für die Angabe der Verzerrungsfreiheit von Operationsverstärkern (OpAmp) sowie von *D/A-* und *A/D-Wandlern* benutzt. Es handelt sich dabei um das Verhältnis des Effektivwerts (RMS) der Trägeramplitude zum Effektivwert der nächst größeren Harmonischen am Ausgang eines Wandlers. SFDR wird normalerweise in dBc angegeben, wobei der Buchstabe „c“ für das Trägersignal (Carrier) steht, oder aber in dBFS, das sich auf den vollen Skalenbereich des Wandlers bezieht.

## S/H, sample and hold Abtast- und Halteschaltung

Eine Abtast- und Halteschaltung (S/H) ist eine elektronische Schaltung, die zwei verschiedene Funktionen erfüllt: Die Entnahme einer Signalprobe aus einer analogen Spannung und das Halten des abgetasteten Spannungswertes für einen bestimmten Zeitraum.

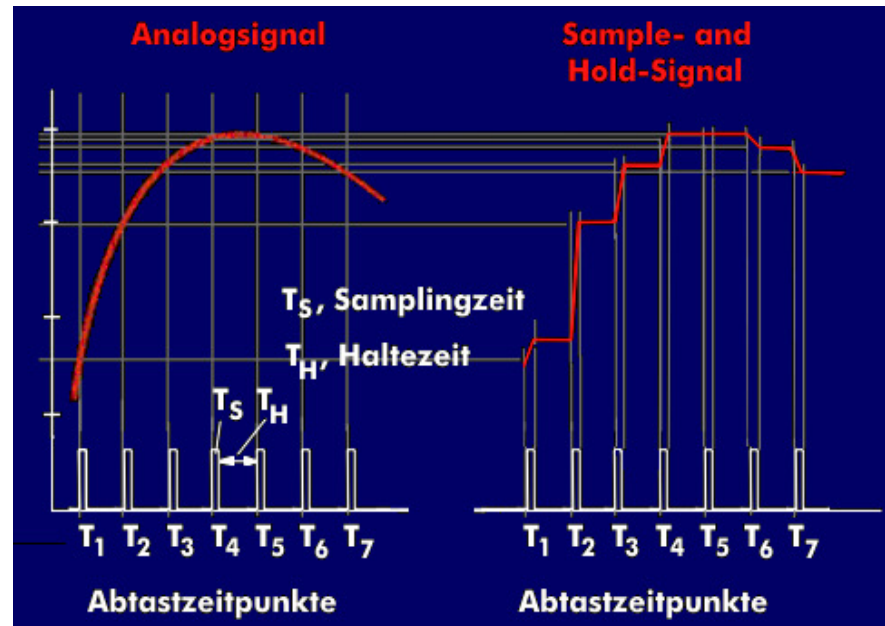
Die Abtastschaltung entnimmt aus dem Signalfluss in periodischen Abständen Signalproben. Vom Schaltungsaufbau handelt es sich um ein aktives Bauelement, einen Transistor, Feldeffekttransistor (FET) oder Operationsverstärker (OpAmp), das als niederohmiger Schalter benutzt wird und vom Taktsignal geschaltet wird. Das Schaltelement ist nur während der



Sample-and-Hold-Schaltung

Samplingzeit ( $T_s$ ) niederohmig, anschließend während der Haltezeit ( $T_H$ ) ist es hochohmig, damit die Ladung nicht aus der Halteschaltung abfließen kann. Bei jeder *Abtastung* wird während der Samplingzeit die Spannungsprobe an die Halteschaltung durchgeschaltet. Während die Samplingzeit relativ

# A/D-Wandler



Abtastung eines Analogsignals mittels Sampling and Hold

kurz ist, ist die Haltezeit entsprechend lang. Das Haltglied ist ein hochwertiger Kondensator, der die Spannungsprobe für eine kurze Zeit zwischenspeichert. Die Zwischenspeicherung ist erforderlich, weil die nachgeschalteten A/D-Wandler Zeit zur *Quantisierung* benötigen, um aus der zwischengespeicherten Spannung einen Digitalwert zu codieren. Um das Abfließen der Kondensatorladung, den so genannten Droop, zu verhindern,

liegt zwischen Haltglied und Digitalisierungsschaltung ein Pufferverstärker.

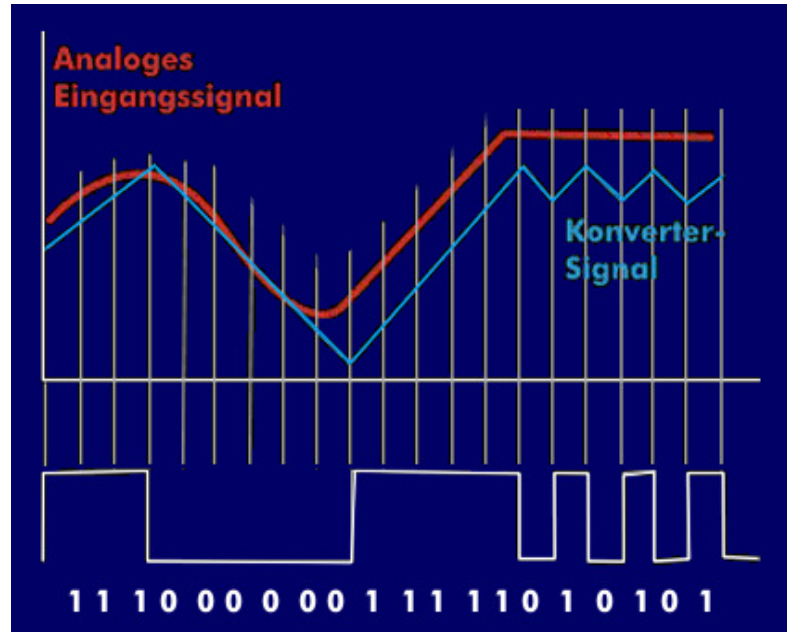
Sample-and-Hold-Schaltungen können diskret aufgebaut sein, sie können aber ebenso als Chips ausgeführt sein und sind normalerweise integraler Bestandteil des A/D-Wandlers.

Alle 1-Bit-Wandler arbeiten als Sigma-Delta-Wandler mit den Techniken des *Oversamplings*, des Noise-Shaping und der digitalen Filterung. Das Verfahren zeichnet sich durch eine sehr hohe *Auflösung* von bis zu 24 Bit aus und wird u.a. in der Audiotechnik, der Consumer-Elektronik und der Kommunikationstechnik eingesetzt.

**Sigma-Delta-Wandler,**  
**SDW**  
*sigma delta converter*



# A/D-Wandler



Prinzip der 1-Bit-Deltamodulation

Vom Prinzip her handelt es sich um ein sehr einfaches A/D-Wandlungsprinzip, das nur ein einziges Bit kennt. Bei der Deltamodulation werden lediglich die Änderungen im Signalpegel digital umgesetzt. Im einfachsten Fall steht die digitale „1“ für eine steigende, die „0“ für eine fallende Spannung. Jedes Bit repräsentiert dabei einen festen Änderungswert. Bleibt die Spannung konstant, findet ein ständiger Wechsel zwischen „1“ und „0“ statt. Diese Modulationstechnik kann bei wechselnder Eingangsspannung eingesetzt werden, wie im Audibereich, eignet sich aber nicht für

Gleichspannung.

Mit der beim Oversampling verwendeten *n*-fachen *Abtastfrequenz* wird die Auflösung und *Genauigkeit* des Delta-Wandlers erhöht. Dies resultiert daraus, dass die Informationstiefe sowohl von der Samplingtiefe als auch von der Abtastrate abhängt. Eine niedrigere Abtastrate und eine hohe *Sampletiefe* haben die gleiche Informationstiefe wie eine hohe Abtastrate und eine niedrige Sampletiefe. So kann ein 1-Bit-Wandler mit einer hohen Abtastrate die gleiche Informationstiefe haben, wie ein 16-Bit-Wandler mit niedriger *Abtastung*. Dieses Grundprinzip macht man sich mit dem Oversampling zunutze.

# A/D-Wandler

Darüber hinaus verteilt sich das effektive Quantisierungsrauschen auf einen breiteren Frequenzbereich. Die Rauschenergie verteilt sich bei  $n$ -facher Abtastfrequenz auf den  $n$ -fachen Frequenzbereich, der Rauschanteil sinkt damit gegenüber der einfachen Abtastfrequenz, was sich in einem höheren *Dynamikbereich* ausdrückt. Beispielsweise erhöht sich bei einem achtfachen Oversampling die Bitzahl um 3, bei einem 256-fachen um 8.

Dem Verfahren nach wird das Binärsignal mit einer hohen Abtastfrequenz abgetastet. Diese ist um ein Vielfaches höher als die Abtastfrequenz, die sich aus dem Abtasttheorem ergibt. Bei einer Compact Disc, die mit einer Abtastfrequenz von 44,1 kHz arbeitet, kann die Oversampling-Abtastrate durchaus bei weit über 10 MHz liegen, was einem über 200-fachen Oversampling entsprechen würde.

Der Delta-Sigma-Modulator setzt ein binäres Eingangssignal beliebiger Bitbreite in einen seriellen Bitstrom um. Dazu wird das Eingangssignal einem Differenzverstärker zugeführt, dem ein Integrator nachgeschaltet ist. Der Ausgangspegel des Integrators wird einem Komparator zugeführt, der diesen mit „0“ oder „1“ bewertet. Die Anzahl der „Einsen“ am Modulatorausgang ist zum Eingangssignal proportional. Der Komparatorausgang wird über einen 1-Bit-D/A-Wandler geführt, der den 1-Bit-Datenstrom in eine positive oder negative Spannung umsetzt, die dann als Regelspannung über den Differenzverstärker dem Integrator zugeführt wird. Das analoge Ausgangssignal wird dadurch erzeugt, indem das Komparatorsignal über einen Tiefpass geführt wird.

**Signal-Rausch-Verhältnis, S/N**  
*SNR, signal to noise ratio*

Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) ist der Quotient aus der Leistung des übertragenen Nutzsignals zur Leistung des Rauschsignals und ein Maß für die Reinheit eines Signals. Da das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Rauschsignal mehrere Zehnerpotenzen umfassen

# A/D-Wandler

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log \frac{\text{Leistung Nutzsignal}}{\text{Leistung Rauschsignal}}$$

*Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses*

Verstärkern, *A/D-Wandlern* und Mikrofonen. Die Dynamik kann immer nur so groß sein, wie das SNR-Verhältnis, da ja sonst der Verstärker bereits das Rauschen verstärken würde. Das Signal-Rausch-Verhältnis kann durch bestimmte Maßnahmen verbessert werden. Neben der Erhöhung des Nutzsignals werden Expandertechniken eingesetzt, bei denen Nutzsignale mit geringem Pegel vor der Übertragung mit höherem Pegel übertragen und nachher wieder dekomprimiert werden. Auch bietet sich der Einsatz von Filter an, die das Rauschsignal ab einer bestimmten Frequenz begrenzen.

kann, wird das Signal-Rausch-Verhältnis im logarithmischen Maßstab angegeben und dafür wird das Dezibel (dB) benutzt. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein wichtiger Kennwert für die *Dynamik* von Vierpolen; so von

## SINAD, signal to noise and distortion

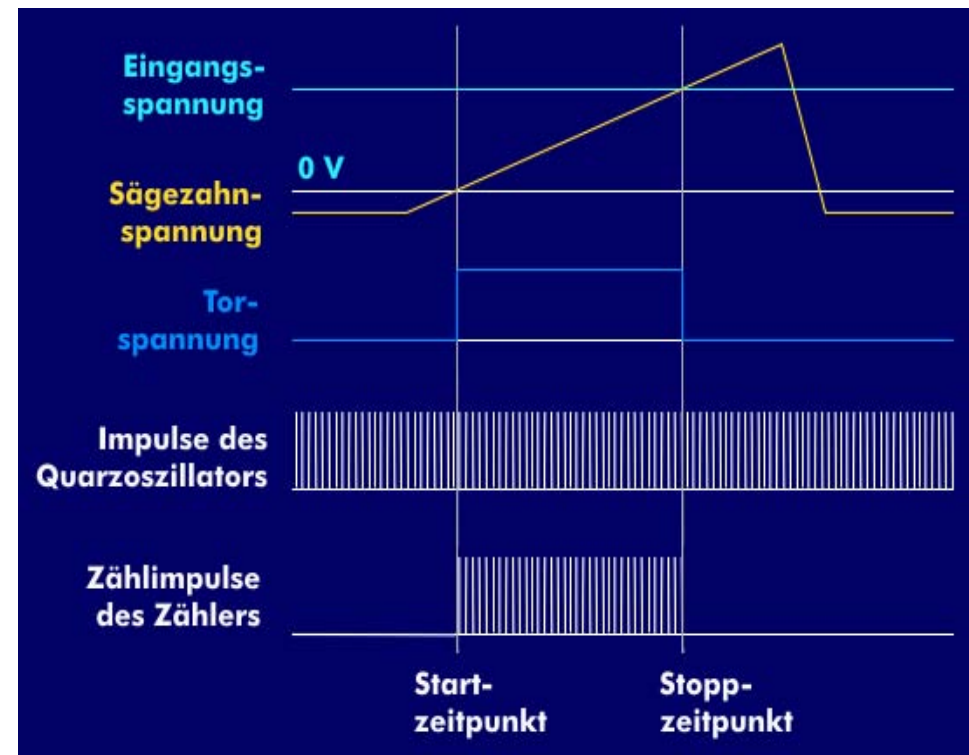
*Signal to Noise And Distortion* (SINAD) ist ein Parameter mit dem eine Aussage über die Qualität eines Audiosignals gemacht werden kann. Mit der für Sinad relevanten Messtechnik können Audio-Empfangsgeräte und anderes Audio-Equipment bewertet werden. Per Definition ist Sinad das Verhältnis der gesamten Signalleistung einschließlich des Rauschens und der von Verzerrungen, zu der des Rauschens mit Verzerrungen. Die gesamte Leistung setzt sich zusammen aus der Signalleistung (S) plus der Rauschleistung (N) plus der Störleistung (D), diese wird ins Verhältnis gesetzt zu der Rauschleistung (N) plus der Störleistung (D): also  $\text{SND/ND}$ , angegeben in Dezibel (dB),  $10 \log ((S+N+D)/N+D)$ . Aus dieser Relation folgt, dass je höher der Sinad-Wert ist, desto besser ist die Qualität des Audiosignals.

# A/D-Wandler

## Slope-Verfahren *slope methode*

In *A/D-Wandlern* werden die verschiedensten Wandlerverfahren eingesetzt. A/D-Wandler Slope-Technik sind relativ einfach aufgebaut und arbeiten mit einer relativ geringen *Abtastrate*. Neben dem Slope-Verfahren, das mit einem Sägezahn arbeitet, gibt es noch das *Zählverfahren* und das *Dual-Slope-Verfahren*, das auf Ladungs- und Entladungsfunktionen basiert.

Das Slope-Verfahren ist ein Vergleichsverfahren, bei dem die zu digitalisierende



Funktionsablauf beim Slope-Verfahren

Eingangsspannung mit einer definierten Sägezahnspannung verglichen wird. Bei Spannungsgleichheit wird aus der definierten Zeit des Sägezahns der Betrag für die Eingangsspannung digital abgeleitet.

Ein Slope-Wandler besteht aus einem Komparator an dessen einen Eingang die Eingangsspannung und an dessen zweiten Eingang ein definierter Sägezahn gelegt wird.

Die Sägezahnspannung steigt von unter 0 V kontinuierlich an,

# A/D-Wandler

bis sie der Eingangsspannung entspricht. Während des Sägezahnanstiegs, also ab dem Spannungswert 0 V, werden von einem Quarzoszillator Pulse an einen Zähler übertragen. Sobald die Sägezahnspannung den Spannungswert der Eingangsspannung erreicht hat, wird der Zählvorgang gestoppt. Die Anzahl der gezählten Pulse ist proportional der Spannungshöhe der Eingangsspannung. Nach dem Zurücksetzen des Zählers kann ein neuer Zählvorgang ausgelöst werden.

## Störspannungsabstand *STN, signal to noise*

Als Störspannungsabstand (STN) wird das Verhältnis zwischen dem Signalpegel und dem Pegel der Störsignale bezeichnet. Bei dem Störsignal kann es sich um Rauschen oder Brummen handeln, das durch Übersprechen, Einstrahlungen von Netzspannungen, von

Codewort- länge (Bit)	Quantis. stufen	Fehler (%)	Störsp.- abst. (dB)
4	16	6,250	24,1
6	64	1,562	36,1
8	256	0,396	48,1
10	1.024	0,097	60,2
12	4.096	0,0244	72,2
14	16.384	0,0061	84,3
16	65.536	0,01529	96,3
18	262.144	0,00381	108,3

*Quantisierungsfehler und Störspannungsabstand bei verschiedenen Quantisierungsstufen*

Impulsen usw. entstehen kann. Der Störspannungsabstand, der in Dezibel (dB) angegeben wird, gilt gleichermaßen für Sprache, Audio und Video und ist ein Maß für die Übertragungsgüte von Kommunikationssystemen. Analoges Audio liegt im Störspannungsabstand bei ca. 60 dB; bei digitalem Audio ist das *Signal-Rausch-Verhältnis* abhängig von der Höhe der *Quantisierung* und liegt bei 16 Bit bei etwa 100 dB. In Kommunikationssystemen hängen die Fehlerrate und die Übertragungreichweite unmittelbar von dem Störspannungsabstand ab.



# A/D-Wandler

## Wandlungsfehler *conversion error*

Wandler- oder Wandlungsfehler sind Ungenauigkeiten von *A/D-Wandlern*, die in direktem Zusammenhang mit der A/D-Konvertierung stehen. Es gibt verschiedene Wandlungsfehler, die in Zusammenhang mit den Toleranzen und den Temperaturkoeffizienten der Bauteile zusammenhängen, mit der *Genauigkeit* und Stabilität der Referenzspannungen, den Nichtlinearitäten der Kennlinien, den differenziellen Nichtlinearitäten und den Unsicherheiten bei den *geringwertigsten Bits* (LSB). Neben diesen Ungenauigkeiten sind die *Quantisierungsfehler* ausschlaggebend für die kumulierten Wandlungsfehler.

## Wandlungsgeschwindigkeit *conversion rate*

Conversion Rate steht für Konversionsrate. Die englische Bezeichnung wird für die Wandlungsgeschwindigkeit von AD-Wandlern benutzt, aber auch in der Webtechnologie. Die Conversion Rate oder Wandlungsgeschwindigkeit ist ein wichtiger Kennwert von *A/D-* und *D/A-Wandlern*. Es handelt sich dabei um die Anzahl der Umwandlungen pro Sekunde. Die Wandlungszeit umfasst alle Verzögerungszeiten von den elektronischen Schaltungen. Sie ist abhängig vom Wandlungsprinzip. So ist beispielsweise das *SAR-Verfahren* mit der sukzessiven Approximation bedingt durch die mehrfache *Wiederholung* wesentlich langsamer als ein *Parallelumsetzer* oder ein CMOS- oder CCD-Sensor für die Video-Umsetzung. Außerdem ist die Wandlungszeit abhängig von der Digitalisierungstiefe. Es gibt Hochgeschwindigkeitswandler die 100 Millionen und mehr Konversionen in einer Sekunde durchführen können.

## Zählverfahren *counting mode*

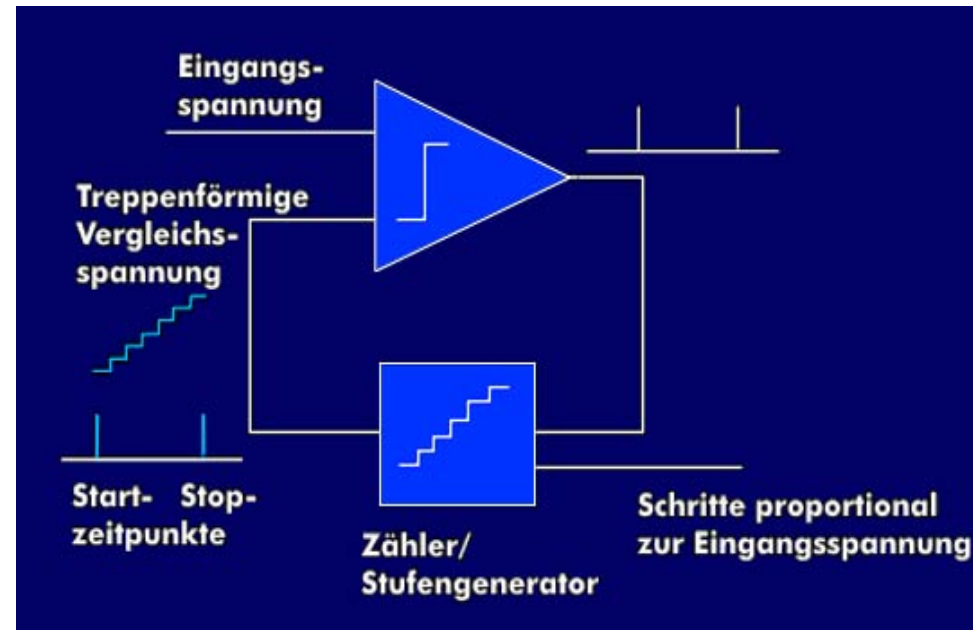
Bei dem Zählverfahren, einem von vielen Verfahren für *A/D-Wandler*, wird die analoge Eingangsspannung in einem Komparator mit einer treppenförmig ansteigenden

# A/D-Wandler

Vergleichsspannung verglichen.

Die Stufenwerte der Treppenspannung entsprechen dem geringst möglichen Pegel, der die höchste *Auflösung* repräsentiert. Die Treppenspannung wird solange durch einen Zähler schrittweise hochgeschaltet, bis die Vergleichsspannung der Eingangsspannung entspricht. Bei Spannungsgleichheit gibt der Komparator einen Impuls ab, der den Treppengenerator stoppt. Die Anzahl der Treppenstufen wird gezählt und entspricht dem Wert der analogen Eingangsspannung.

Da die Stufenschaltung mit dem geringsten möglichen Pegelwert erfolgt, kann die



Umsetzzeit bei höheren Eingangspegeln relativ lang sein, weil die Treppenspannung alle Stufen durchlaufen muss. Das Zählverfahren hat viel Ähnlichkeit mit dem *Slope-Verfahren*, nur dass beim Slope-Verfahren ein Sägezahn benutzt wird und die Zeit mit Zählimpulsen ermittelt wird, bis die Eingangsspannung der

Aufbau des A/D-Wandlers nach dem Zählverfahren

## Herausgeber

Klaus Lipinski  
Datacom-Buchverlag GmbH  
84378 Dietersburg

ISBN: 978-3-89238-169-3

## A/D-Wandler

E-Book, Copyright 2010  
Alle Rechte vorbehalten.  
Keine Haftung für die angegebenen Informationen.



Creative Commons  
Namensnennung- Keine  
Kommerzielle Nutzung - Keine  
Bearbeitung 3.0 Deutschland

**Hinweis** — Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen alle Lizenzbedingungen mitteilen, die für dieses Werk gelten.  
Das E-Book darf nur dann auf fremde Webseiten gestellt werden, wenn ein Backlink auf [www.itwissen.info](http://www.itwissen.info) gesetzt ist.

Layout & Gestaltung: Sebastian Schreiber  
Produktion: [www.media-schmid.de](http://www.media-schmid.de)

Weitere Informationen unter [www.itwissen.info](http://www.itwissen.info)